Université Mohammed V – Agdal
Faculté des Sciences
Département des Sciences de la Terre
- Rabat -

Pr. Driss FADLI (2008/2009)

Eléments de cour de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 1

STRUCTURE DU COSMOS

I - INTRODUCTION

1. – Quelques définitions

- L'Univers est l'ensemble de tout ce qui existe. On l'appelle également le Cosmos ou l'Espace lorsqu'on parle du milieu extraterrestre.
- La Cosmologie est l'étude de la structure, de l'origine et de l'évolution de l'Univers.
- L'Astronomie est la science des corps célestes. (céleste est un mot qui est relatif au ciel).
- L'Astrophysique est l'étude des propriétés physiques des corps célestes.

2. - L'échelle des distances pour mesurer l'Univers

En astronomie on utilise généralement trois sortes d'échelles :

a) - **L'année lumière** : c'est la distance parcourue en un an par la lumière. Elle est notée **al** et elle vaut 9,46 .10^{15} m. (on rappelle que la vitesse de la lumière est d'environ 300.000 km/s).Ex : la lumière du soleil met 8 minutes pour nous parvenir. Quelle est la distance entre la Terre et Soleil ?

b) - **L'unité astronomique**, notée **UA**, est la distance entre la Terre et le Soleil :

1 UA = 150.000.000 km environ.

c) - **Le parsec**, noté **pc**, très utilisé dans l'étude des galaxies ; il correspond à la distance d'un astre (depuis le Soleil) dont *la parallaxe annuelle* correspond à 1 seconde (explication en **fig.1**).
- 1 parsec = 206.265 UA = 3,23 al = 3100 milliards de km.
- 1Mpc = 1 mégaparsec = 1 million pc.

3.- La hiérarchie de l'Univers.

Une **galaxie** est une entité de base de l'Univers ; elle est constituée de milliards d'*étoiles* **(fig.2)**.

Un **amas** est constitué de milliards de *galaxies*

Un **superamas** est constitué de quelques à plusieurs milliers d'*amas*

Notre *Galaxie*, appelée *la Voie Lactée*, n'est qu'une parmi les milliards de galaxies ; elle est constituée de quelques dix milliards d'étoiles. Le Soleil est l'une de ces d'étoiles.

II – NOTRE GALAXIE, LA VOIE LACTEE

La Galaxie (on écrit Galaxie en g majuscule pour faire signifier la Voie Lactée) est une sorte de galette aplatie, en rotation (250km/s), qui présente des bras spiraux **(fig.3).** Son diamètre est d'environ 100.000 al et son épaisseur maximale est de l'ordre de 6.000 al. Elle est formée de 10^{19} étoiles. Le Soleil est l'une de ces étoiles qui forme, avec des planètes qui gravitent autour d'elle, *le système solaire*. Ce dernier est situé à environ de 30.000 al du centre de la Galaxie; il fait le tour complet (dans le sens des aiguilles d'une montre vue de dessus) en 240 millions d'années. (240 Ma = 1 unité galactique).

Le centre de la Galaxie se présente sous forme de bulbe stellaire peu aplati où se condense beaucoup de vieilles étoiles. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne de ce centre les étoiles sont jeunes et elles sont très éloignées les unes des autres (3 al).

Au centre de ce bulbe, existe un **trou noir**, constitué de matière très dense. Il développe un champ gravitationnel si intense qu'aucun rayonnement ne peut s'en échapper. Autrement dit les étoiles proches, seront attirées et englouties par ce trou noir **(fig.4)**.

III – LES GALAXIES

1. – Les différents types de galaxies

Les photographies réalisées aux télescopes terrestres et spatiaux ont permis de mettre en évidence l'existence d'innombrables galaxies semblables à la Voie Lactée. Toutes ces galaxies se situent à des distances supérieures à 2 millions d'années-lumière. Elles sont donc très pâles et occupent un champ de quelques dizaines de secondes d'arc seulement sur la voûte céleste. Les plus faibles d'entre elles se distinguent à peine parmi les étoiles de la Voie Lactée situées au premier plan.

Selon leur morphologie, les galaxies ont été classées par Edwin Hubble **(fig.5)** en quatre catégories :

a) - **Les galaxies elliptiques** ont la forme d'ellipsoïdes plus ou moins aplatis, avec une répartition d'étoiles augmentant vers le centre, mais ne montre aucune structure fine. Elles présentent une symétrie de rotation complète. Suivant leur ellipticité, on les qualifie de E0 (les plus sphériques), E1, E2, ..., ou E7 (les plus aplaties).

b) - **Les galaxies spirales** ont une forme aplatie, la plupart des étoiles brillantes étant concentrées dans un disque peu épais, et suivant des bras que dessinent des spirales à partir de la région centrale. Au niveau du bulbe des galaxies spirales se trouve une grande concentration d'étoiles.

Les galaxies spirales se divisent elles-mêmes en deux branches :

- les spirales normales (S), dans lesquelles les bras partent directement du bulbe, et
- les spirales barrées (SB), dont les bras se détachent à l'extrémité d'une « barre » traversant le bulbe.

Les galaxies spirales, normales ou barrées, se différencient entre elles par l'importance relative de leur bulbe et de leurs bras et par l'ouverture de ces bras. On distingue :

- les Sa et SBa, au bulbe important et dont les bras s'enroulent de façon serrée autour du bulbe,
- les Sc et SBc, au bulbe ténu et aux bras très ouverts,
- les Sb et SBb, aux propriétés intermédiaires.

c) - **Les galaxies lenticulaires** (S0), a été introduite pour désigner certaines galaxies elliptiques très aplaties possédant un bulbe très lumineux et, parfois, de la matière interstellaire absorbante esquissant l'ébauche d'un disque.

d) - **Les galaxies irrégulières**, on ne peut mettre en évidence aucun axe de symétrie et elles sont riches en matière interstellaire et en étoiles jeunes.

En nombre, les 2/3 des galaxies de l'Univers ont une forme spirale, 10% sont elliptiques et 25% lenticulaires. Parmi les galaxies spirales, les 2/3 d'entre elles sont barrées.

Notons enfin que la plupart des galaxies présentent un trou noir au centre du bulbe qui est constitué de la matière dense et émet des ondes radios.

Une projection audio-visuelle de ces types de galaxies sera donnée lors des séances des travaux dirigés. Voir également les sites web suivants :

http://www.futura-sciences.com/galerie_photos/

http://www.fotosearch.fr/photos-images/galaxie.html

2. - Organisation du groupe local et du superamas local

Le **groupe local** (ou **amas local**) est un petit amas d'une vingtaine de galaxies groupées sur 1 Mpc auquel appartient la Galaxie **(fig.6)**. Sa taille est d'environ un million al, dix fois le diamètre de la Voie Lactée. Il comprend :

- deux galaxies satellites, le Grand et le Petit Nuage de Magellan,
- deux autres grandes galaxies spirales : Andromède (M 31, de type Sb), avec ses deux satellites M 32 et NGC205, et la galaxie du Triangle (M33, de type Sc),
- quelques galaxies irrégulières (NGC 6 822, dans le Sagittaire, et IC 1 613, dans la Baleine),
- des galaxies de petites dimensions, peu riches en étoiles (quelques dizaines de millions) et dépourvues de gaz et de poussière interstellaires.

Toutes ces galaxies se déplacent autour d'un centre commun situé entre notre Galaxie et la Nébuleuse d'Andromède.

Le **superamas local** fait partie d'un énorme complexe de 10000 galaxies assemblées dans des amas s'étendant sur quelques 200 millions d'années lumières, appelé Superamas local ou Superamas de la Vierge **(fig.7)**.

Le Superamas de la Vierge et la Superamas de l'Hydre et du centaure smblent, ent eux-mêmes, concerger vers une autre grande agglomération d'amas (superamas) que l'on appelle le *Grand Attracteur*.

3. – L'éloignement des galaxies : l'expansion de l'Univers

Une fois décomposé, le rayonnement émis par une galaxie montre l'ensemble des raies, en absorption et en émission, des étoiles et du gaz qui composent cette galaxie. En se référant à l'effet Doppler-Fizeau, la mesure du déplacement de ces raies par rapport à celles d'une source au repos permet de déterminer la vitesse radiale dont est animée la galaxie.

Ces mesures montrent que la quasi-totalité était des vitesses d'éloignement. Plus une galaxie est lointaine, et plus sa vitesse d'éloignement est grande. Cela se traduit par la *loi de Hubble*, qui peut s'écrire $V = Hd$:

- $V =$ la vitesse radiale (exprimée en kilomètres par seconde),
- d = la distance exprimée en mégaparsecs (10^6 parsecs),
- H une constante nommée **constante de Hubble** (réajustée un certain nombre de fois : la valeur admise actuellement est 15km/s/ al).

La loi de Hubble conduit à l'image simple d'un **Univers en expansion** depuis son origine, *le big bang*, il y a environ 15 milliards d'années. La distance et la vitesse d'éloignement des galaxies sont proportionnelles.

4. - Les quasars

Les *quasars* sont des galaxies impossibles à distinguer des étoiles sur les clichés du ciel, d'où leur nom de quasars (abréviation de *quasi stellar radio sources*). Dans le domaine des ondes radio, elles se caractérisent par une émission très intense provenant d'une région très localisée au centre de la galaxie. Dans le domaine visible, elles sont en moyenne cent fois plus lumineuses que les galaxies normales. Elles sont également de puissants émetteurs de rayonnements γ, x et uv. Cette énergie est d'origine gravitationnelle provenant d'un trou noir massif, siège d'une accrétion de la matière située dans son environnement.

Certains quasars sont entourés d'une enveloppe géante d'hydrogène ionisé qui peut s'étendre jusqu'à quelques centaines de kpc du centre (alors que le disque stellaire conventionnel s'étend jusqu'à 10 kpc, et le gaz jusqu'à 20 ou 30 kpc, dans une galaxie spirale standard). Grâce à l'énorme quantité d'énergie rayonnée par le noyau actif, la matière interstellaire peut-être chauffée et ionisée jusqu'à des distances très grandes, nous révélant ainsi l'existence d'une composante gazeuse aussi éloignée.

IV - LES ETOILES

1 – Evolution des étoiles

Les étoiles constituent une fraction importante de la masse de l'Univers (la Galaxie en contient une centaine de milliards). Elles naissent à partir des nuages interstellaires denses (nébuleuse) grâce à la gravitation qui compresse la matière du cosmos.

A un moment donné le nuage interstellaire atteint l'effondrement; c'est-à-dire une accrétion qui peut avoir lieu lorsque la pression interne devient insuffisante pour contrebalancer les forces d'autogravitation. La température augmente dans la partie centrale et il peut y avoir des réactions nucléaires (cf. chapitre 2) qui donnent naissance à une étoile. Cette dernière se gonflera après quelques milliards d'années et elle peut évoluer de deux façons :

- Si sa masse est faible, elle évoluera en **géante rouge** semblable au soleil. La plupart des étoiles visibles sont dans le même stade d'évolution que le Soleil, c'est-à-dire qu'elles rayonnent l'énergie libérée par la combustion de l'hydrogène en hélium dans leur région centrale. Cette dernière subi une contraction; elle est beaucoup plus denses et plus chaudes (10^8 K). Par contre l'enveloppe se dilate et refroidie. La phase géante rouge des étoiles a une durée d'environ 10 % la phase précédente. La matière finit par se condenser dans la partie centrale grâce à des fusions nucléaires et la géante rouge évolue en **naine blanche**.

- Si la masse est plus grande, l'étoile continue son évolution en passant par la phase géante rouge qu'elle traverse évidemment plus rapidement pour évoluer une **supergéante**. Cette dernière subit une importante explosion qui disperse la plus grande partie de sa masse dans le milieu interstellaire. L'étoile est alors une **supernova**. Les parties centrales des supernovae subsistent non sous forme de naines blanches mais d'étoiles à neutrons en rotation rapide qui émettent des ondes radio de façon très régulière et aussi très rapide appelées **pulsars**. Les étoiles les plus massives peuvent devenir des *trous noirs*.

2. – Couleur et luminosité des étoiles

Les étoiles ne sont pas toutes de la même couleur. Si l'on regarde le ciel de plus près on se rend compte que certaines d'entres-elles sont rouges, d'autres sont bleues, d'autres sont jaunes, blanches...Cette différence de couleur provient essentiellement d'une différence de température superficielle des étoiles. Ces dernières ne montrent pas également la même luminosité.

Il existe une relation entre la luminosité, la couleur et la température qu'on peut résumer sur le diagramme de Hertzprung-Russell **(fig.8)**.

3. - Les constellations

Une constellation est un regroupement d'étoiles visibles à l'oeil nu qui sert pour se repérer dans le ciel. Il s'agit de figures imaginaires formées par des groupes d'étoiles portant des noms d'animaux, d'objets ou de personnages religieux et mythologiques. Le ciel compte 88 constellations recensées par l'union astronomique internationale a divisé le ciel en 88 constellations. Les plus connues sont celles du zodiaque. qui sont traversées par le soleil et qui sont sont divisées en 12 groupements d'étoiles : Balance, Bélier, Capricorne, Crabe, Gémeaux, Lion, Poissons, Sagittaire, Scorpion, Taureau, Verseau et Vierge **(fig.9)**.

V. – LA COMPOSITION DU MILIEU INTERSTELLAIRE

C'est un milieu extrêmement dilué et également très hétérogène; on y trouve à la fois des régions ionisées, des molécules, de la poussière, des nuages relativement denses (10^3 particules par cm^3) et froids (100 K), entourés d'un milieu très dilué (de 0,01 à 10 particules par cm^3) et chaud (10^4 K).

1. - les zones relativement denses

- Les nuages moléculaires, qui sont des nuages relativement denses (10^3 à 10^4 atomes par cm^3) ; leur température est seulement de quelques Kelvin. La grande densité de la matière empêche les photons d'y pénétrer. Le gaz s'y trouve sous forme moléculaire. C'est dans ces nuages que se forment les étoiles.

- Les régions H II sont des régions chaudes, composées d'hydrogène ionisé, chauffées par des étoiles jusqu'à une température de 1000 °K.

- Les restes de supernovae qui sont des nuages de matières issues des couches externes de l'étoile, lorsqu'elle explose.

2. - les régions diffuses

- Les régions H I, composées d'hydrogène neutre, de densité faible 1 atome par cm^3 et dont la température varie entre 50 et 150 °K. Ces nuages ne sont pas chauffés par des étoiles, l'hydrogène reste donc sous forme atomique.

- Les régions inter nuages, de densité très faible (0,05 à 0,2 atome par cm^3) et de température de 6000°K.

VI – LES DIMENSIONS DE L'UNIVERS

Si la masse de l'Univers (par mètre cube) est importante, supérieure à une valeur critique, les forces de gravitation seront importantes; ils tendant à faire rapprocher les objets massifs et l'expansion sera ralenti. L'Univers serait fini et il s'effondrera sur lui-même en un Big Cruch, symétrique du big bang **(fig. 10)**.

Si la masse de l'Univers est moins importante, inférieure à une valeur critique, les forces de gravitation seront faibles; et l'expansion se poursuivra étrnellement en s'accentuant. L'Univers serait spatialement infini.

Si la masse est égale à cette valeur critique, l'Univers est dit "plat" et son expansion ralentirait sans jamais s'arrêter.

La valeur critique de la masse (une sorte de point d'équilibre entre l'expansion et la gravité) calculée de l'ordre de 5.10^{-30} gramme de matière par mètre cube d'Univers en moyenne, c'est à dire 3 atomes d'hydrogène par mètre cube.

La difficulté pour trancher entre les trois hypothèses sus-citées c'est qu'on ne sait pas actuellement la masse exacte de l'Univers. La valeur observée actuellement est de l'ordre de 5.10^{-32} gramme de matière par mètre cube; c'est-à-dire 1/100 de la valeur critique. L'Univers serait ouvert. Cependant il est fort possible qu'une masse importante de matière pourrait se condenser dans les trous noirs situés au centre de la plupart des galaxies. Dans ce cas la masse effective de l'Univers serait supérieur à la valeur critique (l'Univers sera donc fermé).

Actuellement, selon certains auteurs, un autre univers aurait mathématiquement existé avant le Big Bang.

VII – AGE DE L'UNIVERS

L'âge de l'Univers a été estimé à *15 ± 5 milliards d'années*. Il a été obtenu par trois méthodes indépendantes les unes des autres: le mouvement des galaxies, l'âge des plus vieilles étoiles (en examinant leurs spectres) et l'âge des plus vieux atomes (radiochronologie qui sera examinée en chapitre 5).

Université Mohammed V – Agdal
Faculté des Sciences
Département des Sciences de la Terre
- Rabat -

Eléments de cour de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 2

NUCLEOSYNTHESE ET EVOLUTION DE L'UNIVERS

I - INTRODUCTION

Selon les cosmologistes, l'Univers est constitué de deux types de matière :

- La matière ordinaire formant étoiles et des galaxies visibles ; elle représente un faible pourcentage de la masse de l'Univers et dont connaît les propriétés physiques,

- La matière noire, invisible qui n'est perceptible que par son influence gravitationnelle sur la matière visible. Elle a été détectée dans le centre de la plupart des galaxies en particuliers les quasars et dans certaines étoiles. Elle représente un grand pourcentage de la masse de l'Univers et elle serait d'une nature différente de la matière ordinaire. Les lois de la physique régissant cette matière demeurent inconnues.

On s'intéresse donc qu'à la matière ordinaire. Celle-ci est issue des éléments chimiques du tableau de *Mendeleïev* **(fig.1)** parmi lesquels l'hydrogène est l'élément le plus abondant (90%) dans l'Univers. Les autres éléments montrent une décroissance progressive de leur abondance en fonction des numéros atomiques croissants. On note cependant que 3 éléments échappent à cette règle : le Lithium, le Béryllium et le Bore qui sont des éléments moins abondants qu'il va falloir expliquer **(fig.2)**.

Tous ces éléments, formant la matière ordinaire de l'Univers, résultent de la **nucléosynthèse.** Celle-ci correspond à la formation des noyaux atomiques, à partir des **particules élémentaires de base**, dans les différents sites astrophysiques **(fig.3)**. Elle est intimement liée à la physique nucléaire.

Dans ce chapitre on tentera de montrer les différentes étapes conduisant à la formation des éléments chimiques et leur évolution depuis la création de l'Univers jusqu'à l'actuel.

II - NUCLEOSYNTHSE PRIMORDIALE ET NAISSANCE DE L'UNIVERS

1 – Les particules élémentaires de la matière

Jusqu'en 1964, on croyait qu'il n'existait que trois *particules élémentaires* constitutives de l'atome : l'électron, le proton et le neutron. Cependant, de nombreuses particules instables, de durée de vie de l'ordre de 10^{-23} secondes, avaient été détectées soit dans le rayonnement cosmique, soit dans les chocs de haute énergie créés au laboratoire dans les *accélérateurs de particules (collisionneurs).* Plus l'énergie de collision est élevée, plus les nouvelles particules créées seront massives en donnant des renseignements sur les constituants ultimes de la matière.

Plusieurs particules élémentaires ont été mises en évidence, à partir desquelles les protons et neutrons (et donc les noyaux atomiques en captant les électrons) seront constitués pour former toute la matière dans sa quasi infinité.

Les constituants de base de la matière sont appelés les **fermions**. L'interaction entre ces particules pour former la matière nécessite :

- d'autres particules porteuses d'énergie ou de "forces" appelées les **bosons**.
- des interactions physico-chimiques fondamentales.

a - Les fermions

Les fermions sont des particules sphériques avec un rayon qui est inférieur à 10^{-19} m (il s'agit d'une échelle inférieur au femtomètre; ce dernier étant qui est égal 10^{-15}m ; soit un milliardième de micromètre).

Les fermions se répartissent en deux groupes les **quarks** et les **leptons.**

a_1. - Les quarks

En 1975 les physiciens ont détectés expérimentalement que protons et neutrons sont eux-mêmes constitués de quarks. On distingue six types de quarks, notés u, d, s, c, b et t. Les deux premiers, plus légers, forment la matière ordinaire. Chacun de ces quarks porte une charge électrique (quark u = +2/3 et quark d = -1/3) et un nombre quantique de «couleur» : bleu, jaune ou rouge. La taille des quarks est théoriquement ponctuelle, mais en réalité elle est inférieure à 10^{-18} m; soit au moins mille fois plus petite que la taille d'un *nucléon* (proton ou neutron) qui est de l'ordre de 10^{-15} m.

Les quarks sont incapables d'exister seuls. Ils peuvent s'agréger de deux manières différentes en donnant naissance à des particules composites qu'on appelle les **hadrons**. Ces derniers se groupent en deux familles :

- **les baryons** qui sont toujours formés d'un triplet de quarks :
- Les *nucléons* c'est-à-dire les protons et les neutrons qui sont les baryons les plus courants, constitués de quarks légers (u et d),
- Les *particules instables* (particules A) constituées d'autres triplets formés de quarks plus exotiques et plus lourds.
- **les mésons** c'est-à-dire des paires de quark et d'antiquark qui sont des particules très instables.

a_2 - Les leptons

Les leptons sont de deux types :

- **l'électron** e^-, chargé négativement, gravite autour du noyau atomique Z^+ chargé positivement. Sa taille est de l'ordre du femtomètre. L'antiélectron est appelé *positron.*
- **le neutrino** est une particule ayant une charge nulle et il est 50.000 fois plus petit qu'un électron. Sa masse extrêmement faible. Son rôle dans la nucléosynthèse reste une énigme.

Les neutrinos sont abondamment produit par les étoiles dont notre Soleil : à chaque seconde, des centaines de milliards de neutrinos solaires peuvent traverser la Terre et notre corps sans subir le moindre choc ! D'où la difficulté extrême à les détecter...

b - Les bosons

Les forces ne s'exercent entre deux fermions que s'il y a échange d'une particule médiatrice, appelée *boson*. Plus ce dernier sera lourd, plus l'interaction sera de courte portée.

Les principaux bosons sont : le **photon, les gluons** et **les bosons W^+, W^-, Z.** Par exemple, on a mis en évidence que deux quarks porteurs d’une charge de couleur échangent entre eux un gluon.

2. – L’antimatière

La Physique quantique a permis également de mettre en évidence qu'à chaque type particule, existe une **antiparticule** qui lui est opposée et qui est de très courte durée de vie.

Dans la réaction matière antimatière, la conversion est total, le rendement est de 100% : 1 kg d’hydrogène en présence de 1 kg anti-hydrogène dégagerait de l'énergie qui est équivalente à celle d’une centrale géante pendant 10ans de fonctionnement. Pour fabriquer de l’antimatière dans les

accélérateurs de particules, il faut dépenser des milliards de fois plus d'énergie que ce que l'on retient, sans oublier que la quantité de matière fabriquée jusqu'à présent ne suffit même pas à remplir une petite cuillère d'antiatomes.

3. – Les interactions fondamentales

a - La gravitation

La force de gravitation résulte de l'interaction d'un objet massif qui modifie les propriétés de l'espace, en créant autour de lui un champ qui peut être ressenti jusqu'aux distances les plus éloignées. On attribue l'interaction gravitationnelle à l'échange d'une particule encore mystérieuse, appelée *graviton* (qui est un boson, non encore détecté et qui est responsable de l'attraction de l'électron autour du noyau atomique). La gravitation est omniprésente aux niveaux macroscopique et microscopique. Lorsque d'autres interactions peuvent se manifester, la gravitation devient tout à fait négligeable

b - L'électromagnétisme

L'*interaction électromagnétique* agit sur la charge des particules Elle résulte de la communication des particules chargées qui créent autour d'elles un champ électromagnétique. Ce dernier se propage à la vitesse de la lumière jusqu'à de très grandes distances. La physique quantique décrit cette interaction comme l'échange de *photons* entre particules chargées.

c.- L'interaction nucléaire forte

L'interaction nucléaire forte est responsable de l'union des quarks ensembles en assurant une forte cohésion des nucléons et donc des noyaux des atomes. Elle est très intense, elle n'agit qu'à très faible distance, pas plus loin que le rayon du noyau. Elle est aussi à l'origine des phénomènes de fission et de fusion nucléaires.

d. – L'interaction nucléaire faible

L'interaction nucléaire faible correspond à l'échange de bosons W et Z entre les fermions portant une «charge faible». Elle est beaucoup moins intense que l'électromagnétisme ; sa portée est inférieure à la taille des noyaux. Cette interaction faible est responsable de la radioactivité bêta et grâce à laquelle la matière a vaincu l'antimatière.

3.- Le Big bang

Il y a environ *15 milliards d'années* l'Univers est né dans des circonstances inconnues, car les lois physiques qui régissent notre Univers ne semblent pas pouvoir s'y appliquer. La conception traditionnelle de "Grosse Explosion" dite **big bang** [1] suggère que le cosmos résulte d'un point de densité infinie où toutes les lois connues de l'espace et du temps n'ont pas eu lieu.

Le big bang marque l'instant zéro de l'Univers qui, à son origine, n'a rien en commun avec celui que nous connaissons : la densité de matière et la température sont infinies.

4.- Les événements de la première seconde de la création de l'Univers

Grâce à la physique des particules on a pu reconstituer les premiers événements qui se sont déroulés durant la première seconde suivant le big bang **(fig.4)**. L'Univers se trouvait constitué d'un mélange de particules élémentaires qui vont interagir en passant par des étapes successives qu'on peut résumer de la façon suivante :

- 0 à 10^{-43} secondes : domaine de la superforce

- Température de 10^{32}K appelée *température de Planck.*

---

[1] Terme inventé dans les années 1950 par l'astrophysicien anglais Fred Hoyle pour désigner avec ironie le concept "d'explosion originelle" introduit dans le modèle cosmologique initialement développé dans les années 1920 par l'astrophysicien belge Georges Lemaître et le physicien russe Alexander Friedmann.

- Apparition de paires de particules–antiparticules qui font naître de l'énergie très intense régnant dans tout l'Univers (encore assez petit), et qui disparaissent, en s'annihilant, continuellement, déformant sans arrêt la trame de l'espace-temps.

- Les 4 interactions fondamentales seront mis en jeu ensemble; c'est pourquoi on appelle cette étape : domaine de la **superforce**.

- 10^{-43} à 10^{-35} seconde : séparation des forces

- Température est toujours de 10^{32} K
- L'Univers était toujours animé d'éphémères particules et antiparticules fantômes.
- La superforce se scinde en deux forces : la *gravitation*, et la *force électronucléaire*.
- La gravitation fait donc sécession et quitte le monde quantique.
- La force électronucléaire regroupe *l'interaction forte et l'interaction électrofaible*. Cette force elle est décrite par la théorie dite la de *Grande Unification*

- 10^{-35} à 10^{-12} seconde : de l'inflation à l'expansion

- Température est de 10^{25} °K
- Apparition de quarks et d'antiquarks qui surgissent du vide quantique dans un bain de photons et qui sont en perpétuelle *annihilation - matérialisation*. Un petit excédent de matière va apparaître (1 pour 1 milliard); il sera à l'origine la matière de l'Univers tel que nous le voyons actuellement.
- Le volume de l'Univers augmente d'un facteur 10^{27} alors que dans les 15 milliards d'années suivantes, son volume n'augmentera que d'un facteur 10^{9}. Cette étape est dite *période d'inflation*; elle correspond à une grande expansion qui a dépassé la vitesse de la lumière.
- *La force électronucléaire se scinde en interaction forte* et en *interaction électrofaible*. Avec la gravitation, il existe donc désormais *trois forces* distinctes dans l'Univers.

- 10^{-12} à 10^{-6} seconde : naissance des leptons

- Température = 10^{15} °K.
- L'Univers grossit pour devenir une sphère de 300 millions de kilomètres.
- *L'interaction électrofaible se dissocie à son tour en interaction nucléaire faible* et en *interaction électromagnétique. Les 4 interactions fondamentales de l'Univers sont donc différenciées comme elles le sont toujours actuellement*.

*- 10^{-6} **s** à 1 seconde : formation de hadrons*

- Température = 10^{13} °K.
- Les quarks et les antiquarks s'agglutinent en Baryons et antibaryons qui s'annihilent. Un résidu de baryons de 10^{-9} demeure pour former la matière visible.
- Le volume de l'Univers est équivalent au système solaire actuel, soit 10^{13} m.
- La baisse de température fait que les quarks n'ont plus assez d'énergie pour exister seuls. L'interaction forte peut alors les grouper en *hadrons*.
- La fin de cette période marque aussi la *disparition des antiquarks*. Les éléments de base de la matière sont désormais au grand complet, mais la température est toujours trop élevée pour que les atomes puissent se former. L'Univers est une grosse masse lumineuse de plasma brûlant formé de hadrons et de leptons célibataires. Les neutrinos cessent d'interagir avec la matière et s'en séparent.

5. - La nucléosynthèse primordiale = formation de noyaux atomiques

Une seconde à 3 minutes après le Big Bang :

- La température chute à 10^6 °K elle est suffisamment basse pour que les protons et neutrons puissent s'assembler durablement.

- Les protons seuls forment des *noyaux d'hydrogène*. Les protons et neutrons qui se rencontrent, peuvent aussi s'assembler pour former des *noyaux d'hélium* (2 protons + 2 neutrons). Cette phase se nomme la *nucléosynthèse primordiale*. La matière de l'Univers se compose alors des noyaux d'atomes suivants : 75% d'hydrogène H et 25% d'hélium He.

- des traces de Li-7 (lithium à 3 protons et 4 neutrons) et d'isotopes tels que Deutérium (H-2), He-3, He-4...

- les *électrons sont toujours libres* car ils sont encore très énergétiques. Ils ne se lient donc pas encore aux noyaux pour former les atomes H (hydrogène) et He (hélium).

6. – La transparence de l'Univers (3 minutes à 300 000 ans)

Cette époque est caractérisée par une chute de la température (10^4 °K) due à la dilution de l'Univers par expansion. Il en résulte un calme relatif des forces nucléaires qui permettent à la matière de se stabiliser.

Les forces gravitationnelles créent des différences de densités qui s'amplifient et attirent ainsi davantage de matière. L'Univers s'organise peu à peu en régions denses noyées dans le vide cosmique.

La chute de température et de densité de l'Univers permet aux photons de cesser d'interagir avec la matière : ils vont pouvoir enfin traverser l'Univers sans obstacle : il y a *découplage* entre les photons et la matière. Celle-ci étant constituée essentiellement d'atomes d'hydrogène et d'hélium (en faible proportion).

Pendant cette époque l'Univers devient donc subitement transparent et la lumière libérée et provenant de tout point de l'espace a été actuellement captée par les astrophysiciens : c'est le "*rayonnement fossile*" de l'Univers, vestige du big bang.

III.- LA NUCLEOSYNTHSES STELLAIRE

Lorsque l'Univers était âgé d'environ 300 000 ans, des fluctuations minimes de température associées à celle de la densité apparaissent. Ces fluctuations font apparaître des zones plus denses qui attirent alors la matière environnante du fait de leur plus grande attraction gravitationnelle. La matière va donc se comprimer dans ces zones qui deviennent de plus en plus denses en s'échauffant formant ainsi des étoiles. Celle-ci étant une boule de gaz, surtout de l'hydrogène (90% des atomes) et de l'hélium (9% environ). La température y est suffisamment élevée pour que des réactions nucléaires successives puissent se déclencher en plusieurs étapes successives **(fig.5)** :

- Pendant la plus grande partie de sa vie, l'étoile se contente de convertir à un rythme régulier de l'hydrogène en hélium dans son cœur en libérant de l'énergie.

- Quand l'hydrogène s'épuise au centre de l'étoile, celle-ci réajuste sa structure pour compenser l'arrêt de cette production d'énergie: le coeur se contracte et se réchauffe assez pour que l'hélium puisse à son tour "brûler" en donnant du carbone avec libération d'énergie. A ce stade l'étoile va acquérir une structure en couches concentriques. Pour évacuer toute cette énergie, l'enveloppe de l'étoile se dilate considérablement : l'étoile devient alors une "géante rouge", beaucoup plus lumineuse qu'avant mais plus froide en surface.

- Quand l'hélium s'épuise au centre l'étoile massive, celle-ci réajuste à nouveau sa structure, permettant la combustion du carbone dans la région centrale. Autour de ce coeur, on trouve une zone où l'hélium fusionne en carbone, puis une autre où l'hydrogène fusionne en hélium, puis enfin une zone trop froide où l'hydrogène reste inerte.

- Le même scénario peut se reproduire jusqu'à ce que l'étoile aboutisse à une structure complexe en couches concentriques, avec un coeur où se fait la synthèse du fer (très stable), entouré de couches

successives d'éléments de plus en plus légers (silicium, oxygène, néon, carbone, hélium) jusqu'à une enveloppe extérieure d'hydrogène.

Ces différentes étapes sont d'ailleurs de plus en plus brèves; les centaines de millions d'années de la fusion de l'hydrogène deviennent des centaines de milliers d'années pour la fusion de l'hélium, des années pour celle du carbone, des jours pour celle du néon, et les dernières étapes ne prennent plus que quelques minutes.

Les étoiles légères comme le Soleil ne peuvent pas atteindre des températures suffisantes pour permettre la fusion du carbone. Quand elle perd toute source d'énergie nucléaire, il ne lui reste plus qu'à se contracter sous l'effet de la gravitation, en devenant plus chaude et plus dense et en se transformant en une naine blanche. Celle-ci ne peut plus que se refroidir régulièrement, ce qui peut durer quelques milliards d'années.

VI -LA NUCLOSYNTHESE EXPLOSIVE ET REACTION DE SPALLATION

Les étoiles massives continuent de grossir et de synthétiser des éléments de plus en plus lourds à cause de l'élévation de la température (5 milliards °K). A un moment donné l'énergie thermique dépassera l'énergie de liaison des nucléons. Il en résulte une explosion : c'est la supernova.

La matière qui est projetée dans l'espace lors de l'explosion est soumise à un très important flux de neutrons qui s'échappe de l'étoile à neutrons. Les noyaux les plus lourds de la nature (jusqu'à l'uranium) sont ainsi formés par capture rapide de neutrons par les noyaux issus de différentes phases de combustion de l'étoile dans les couches externes de la supernova qui explose. C'est le phénomène de *nucléosynthèse explosive*. Par exemple, les études ont permis de comprendre la production de l'or dans l'Univers par une succession de captures de neutrons et de désintégrations.

La formation de certains noyaux moins légers tels que le lithium (Li), le béryllium (Be) et le bore (B) s'explique par des *réactions de spallation*. Ces derniers se caractérisent par l'action du rayonnement cosmique (flux de particule à haute énergie présent dans l'espace) qui fait éclater les noyaux atomiques lourds (carbone, azote, etc.) présents dans le milieu stellaire en produisant ces trois éléments. C'est ce qui explique leur rareté dans l'Univers.

V - LA PHASE INTERSTELLAIRE

Le milieu interstellaire est composé de restes de supernovas et de nébuleuses planétaires. C'est un milieu froid de quelques dizaines de degrés, favorable aux réactions nucléaires électromagnétiques. Il en résulte la formation d'atomes à partir des noyaux et la combinaison de l'hydrogène avec les éléments lourds pour former des molécules complexes parmi lesquelles on distingue l'eau, l'ammoniac et des molécules organiques. Ces dernières se présentent sous forme de pellicules de glace sur la poussière et elles ont la possibilité de se recombiner grâce au rayonnement cosmique.

VI - LA PHASE PLANETAIRE

La présence de molécules complexes dans le milieu interstellaire favorise la formation de planètes. L'évolution moléculaire de se poursuit à la suite d'une condensation de la poussière interstellaire en noyaux de plus en plus gros en absorbant les petits. Ces noyaux finissent par réaliser les conditions pour la synthèse de nouvelles molécules pour donner naissance à des planètes. Pour cela, il faut que cette poussière se trouve dans une zone ayant une température modérée, qu'elle retienne du gaz en formant une atmosphère, permettant une protection contre le rayonnement cosmique et ultraviolets et qu'elle soit alimentée en énergie à partir des étoiles. Cette phase planétaire sera examinée en détail dans le chapitre 3.

Université Mohammed V – Agdal
Faculté des Sciences
Département des Sciences de la Terre
- Rabat -

Eléments de cour de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 3

LE SYSTEME SOLAIRE

I – QUELQUES DEFINITIONS

L'Union Astronomique Internationale (UAI) lors de sa 26e assemblée générale qui s'est tenue à Prague du 14 mai au 25 août 2006 a redéfini les objets célestes du système solaire comme suit :

- une **"planète"** est un corps céleste qui :

  (a) est en orbite autour du Soleil,

  (b) a suffisamment de masse pour que sa propre gravité surmonte les forces rigides de corps de sorte qu'elle assume une forme hydrostatique d'équilibre, sous une forme sphérique,

  (c) a éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche.

- une "**planète naine**" est un corps céleste qui

  (a) est en orbite autour du Soleil,

  (b) a suffisamment de masse pour que sa propre gravité surmonte les forces rigides de corps de sorte qu'elle assume une forme hydrostatique [2] d'équilibre (presque ronde),

  (c) n'a pas dégagé le voisinage autour de son orbite, et (d) n'est pas un satellite.

- Les autres objets en orbite autour du soleil sont appelés **Petits Corps du Système Solaire.**

Ainsi conformément à ces définitions le système solaire est constitué par :

- le Soleil qui est une étoile ;
- huit planètes qui gravitent autour du Soleil dans un plan appelé écliptique Il s'agit de **Mercure, Venus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune**. Leur orbite est subcirculaire dans le sens anti-horaire (si regarde le nord du Soleil à partir du haut) sauf pour Venus et leur axe de rotation, est presque perpendiculaire à l'écliptique sauf pour Uranus qui est inclinée.**(fig.1)** ;
- des satellites (60) qui gravitent autour des planètes ;
- des planètes naines dont **Pluton, Cérès , Charon, Eris et MakeMake.**
- plusieurs **Petits Corps du Système Solaire** dont les astéroïdes et les comètes
- le milieu interplanétaire inclut au moins 2 constituants :

a) - la poussière interplanétaire qui sont des particules solides microscopiques,

b) - le gaz interplanétaire, que l'on appelle aussi *plasma*, qui est un courant de gaz chaud avec des particules chargées, pour la plupart, de protons et d'électrons. Ce courant provient du Soleil et il est appelé le **vent solaire.**

La répartition de la masse à l'intérieur du système solaire se présente de la façon suivante : Soleil : 99,85%; Planètes : 0,13%; Comètes, Satellites, Astéroïdes, Milieu Interplanétaire : 0,02%

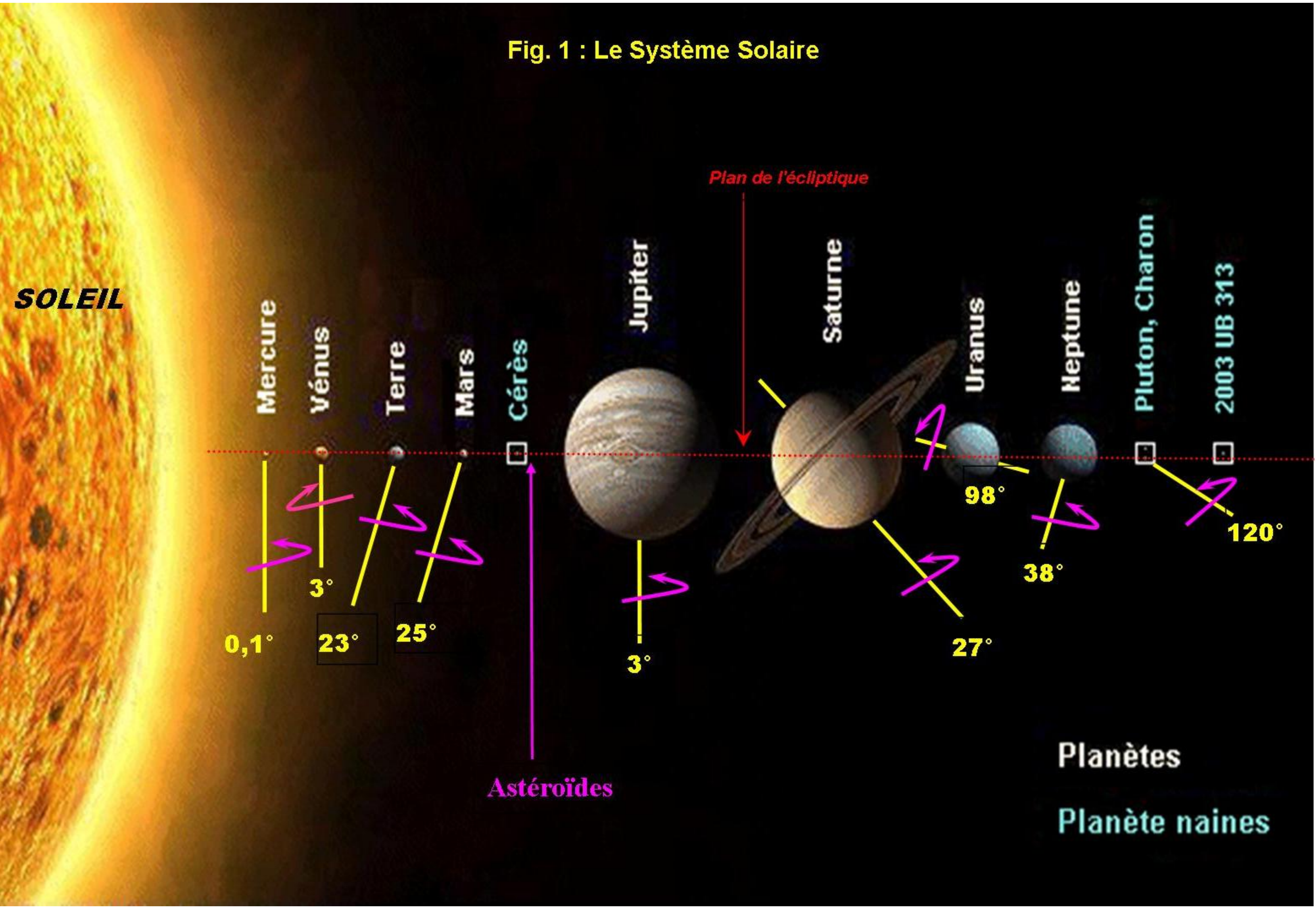


Fig. 1 : Le Système Solaire

II - DIMENSIONS DU SYSTEME SOLAIRE

Parties il y a 31 ans, les sondes américaines Voyager 1 et 2 révèlent récemment que notre système solaire n'est pas aussi rond qu'on le pensait. Il a la forme d'un œuf.

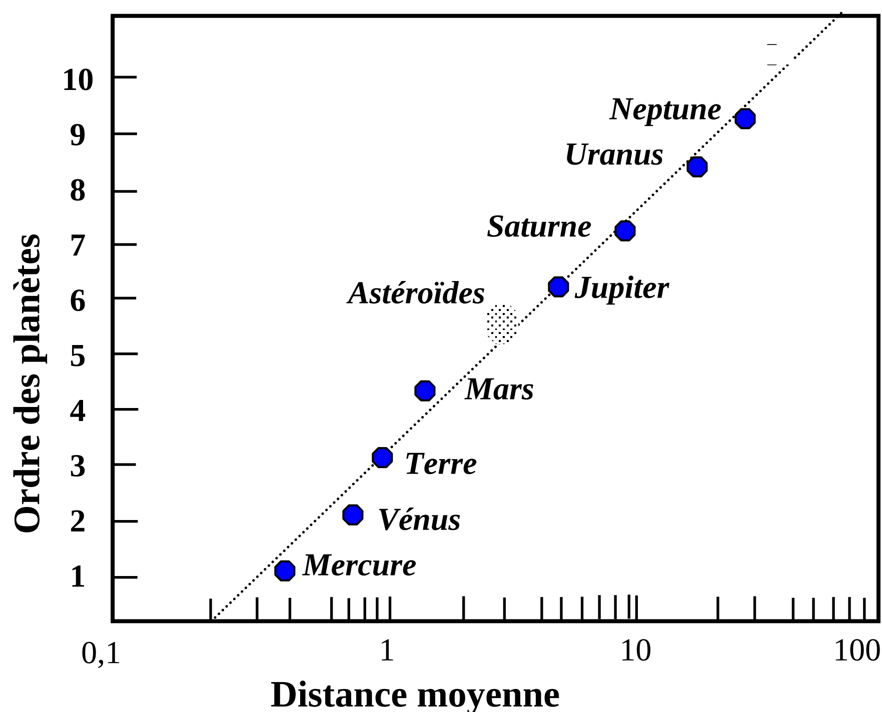
Les dimensions de ce système sont spécifiées en terme de distance moyenne de la Terre au Soleil, appelée unité astronomique (1UA=150.000.000 km). La plus lointaine des planètes connues, Pluton, a son orbite distante de 39,44 UA.

Les distances Soleil-planètes sont établies par la loi de Bode où *chaque planète est deux fois plus éloignée du soleil que sa voisine intérieur* **(fig.2)**. On peut retrouver les demi-grands axes relatifs approximatifs en appliquant la règle simple suivante, basée sur la Loi de Titus-Bode.

- soit la suite : → 0 - 3 - 6 - 12 - 24 - 48 - 96 - 192 - 384 ;
- ajouter 4 : → 4 - 7 - 10 - 16 - 28 - 52 - 100 - 196 - 388 ;
- diviser par 10 : → 0,4 - 0,7 - 1,0 - 1,6 - 2,8 - 5,2 - 10 - 20 - 39.

Le résultat est très proche de la réalité (0,38 - 0,72 - 1,0 - 1,5 - 5,2 - 9,5 - 19 - 30), hormis la valeur 2,8 (qui correspond en fait à la ceinture d'astéroïdes) et Neptune, pour laquelle l'erreur est de quelque 30 %.

Fig. 2 . : **La loi de Bode**. La distance au Soleil est exprimée en unités astronomique



Au delà de l'orbite de Neptune existe une autre ceinture d'astéroïdes appelée *ceinture de Kuiper* située entre 30 et 50 UA **(fig.3)**.

La frontière entre le système solaire et l'espace interstellaire est appelée *héliopause.* Elle est estimée apparaître quelque part au delà de 120 UA.

Cependant les comètes, parcourent les plus grandes distances autour du Soleil; elles ont des orbites très excentrées allant jusqu'à 50.000 UA ou plus.

Le plus près voisin stellaire du Soleil est une étoile naine rougeâtre appelée *Proxima du Centaure.* Elle est située à 4,3 années- lumières de la Terre.

III – CARACTERES GENERAUX DES PLANETES

Contrairement aux étoiles, les planètes n'émettent pas de lumière ; elles sont éclairées par le Soleil et renvoient sa lumière. On peut distinguer deux types de planètes dans le système solaire :

Les planètes Telluriques qui sont les quatre planètes les plus près du Soleil : Mercure, Vénus, Terre et Mars. Elles sont appelées Telluriques parce qu'elles ont une surface compacte et rocailleuse comme celle de la Terre. Les 3 dernières ont des atmosphères importantes tandis que Mercure n'en a pratiquement pas.

Les planètes Joviennes sont gigantesques comparées à la Terre et parce qu'elles sont d'une nature gazeuse comme Jupiter. Elles sont aussi appelées les *géantes gazeuses*, bien que certaines d'entre elles, ou toutes, devraient avoir de petits noyaux solides. Jupiter, Saturne, Uranus, et Neptune

La distance approximative entre les planètes et le Soleil ainsi que d'autres informations statistiques sur ces planètes sont résumées dans le tableau ci-après :

	Distance (AU) Par rapport à la Terre	Rayon (km)	Masse (par rapport à la Terre)	Révolution (en jours)	Rotation (jours ou heures)	# Lunes (satellites)	Inclin_orbi / l'écliptique	Inclinaison équateur	Excentricité Orbitale	Densité (g/cm³)
Soleil	**0**	**696.000**	**332.800**		**25-36**	**9**	**---**	**---**	**---**	**1,41**
Mercure	**0,39**	**2.962**	**0,05**	**87**	**58,7 j**	**0**	**7°**	**0,3°**	**0,21**	**5,43**
Vénus	**0,72**	**6.051**	**0,89**	**224**	**243 j**	**0**	**3,39°**	**3°**	**0,01**	**5,25**
Terre	**1,0**	**6.378**	**1,00**	**365**	**24 h**	**1**	**0,00**	**23°**	**0,02**	**5,52**
Mars	**1,5**	**3.392**	**1,07**	**686**	**24,6h**	**2**	**1,85°**	**25°**	**0,09**	**3,95**
Jupiter	**5,2**	**71.492**	**318**	**4.332**	**9,8 h**	**16**	**1,31°**	**3°**	**0,05**	**1,33**
Saturne	**9,5**	**60.268**	**95**	**10.759**	**10,6 h**	**18**	**2,49**	**27°**	**0,06**	**0,69**
Uranus	**19,2**	**25.559**	**15**	**30.685**	**17,2 h**	**15**	**0,77**	**98°**	**0,05**	**1,29**
Neptune	**30,1**	**24.764**	**17**	**60.190**	**16,1 h**	**8**	**1,77**	**30°**	**0,01**	**1,64**

Pour plus de détail concernant le système solaire en chiffres consultez les sites web :

http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/astronomie/Promenade/pages3/376.html

http://www.solarviews.com/

IV - LES PLANETES NAINES

Sont des corps solides et se répartissent en deux catégories :

- celles qui sont plus près du Soleil comme Cérès qui était classé jusqu'ici comme astéroïde et qui devient une planète naine et puis il a y Pluton et Charon. Recemment (16/08/2008) les astronomes suggèrent que Charon, au lieu d'être un satellite de Pluton, forme avec lui une planète naine double. Pluton et Charon formant un système binaire orbitent tous les deux autour d'un point situé dans l'espace.

- d'autres qui sont au-delà de Pluton, issus de dans la ceinture de Kuiper dont le nombre reste à déterminer. On en connait, Eris (entre 2.400 à 3.000 km) et *makémaké* (27%plus massive que pluton).

La distance approximative entre les planètes naines et le Soleil ainsi que d'autres informations statistiques sur ces planètes sont résumées dans le tableau ci-après :

	Distance (AU) Par rapport à la Terre	Rayon (km)	Masse (par rapport à la Terre)	Révolution (en jours)	Rotation (jours ou heures)	# Lunes (satellites)	Inclin_orbi / l'écliptique	Inclinaison équateur	Excentricité Orbitale	Densité (g/cm³)
Soleil	**0**	**696.000**	**332.800**		**25-36**	**9**	**---**	**---**	**---**	**1,41**
Terre	**1,0**	**6.378**	**1,00**	**365**	**24 h**	**1**	**0,00**	**23°**	**0,02**	**5,52**
Cérès	**2,76**	**450**	**0,0002**	**21.681j**	**9 h**	**0**	**10,58°**	**10,6°**	**0,08**	**2,12**
Pluton	**39,5**	**1.142**	**0,002**	**90.800j**	**6,4 j**	**0**	**17,15°**	**120°**	**0,25**	**2,03**
Charon	**39-49**	**603**	**0,00013**	**586x365j**	**6 j**	**2**	**98°**	**17°**	**0,38**	**1,71**
MakeMake	**45**	**900**	**?**	**30.685j**	**?**	**?**	**?**	**?**	**0,15**	**?**
Eris	**97**	**1.200**	**0,054**	**203450j**	**8 h**	**1**	**45°**	**?**	**0,44**	**2**

V – LE SOLEIL

1. - Structure

Le Soleil est une sphère de rayon d'environ 696.000 km. Sa température de surface est de 5.800°K; elle augmente jusqu'à 15.000.000 °K au centre. Il accomplit une rotation complète en 25 jours à l'équateur et 36 jours aux pôles. Ce phénomène, appelé "rotation différentielle" est dû au fait que le Soleil n'est pas un corps solide comme la Terre. Par contre, le noyau du Soleil tourne comme un corps solide.

Le Soleil est actuellement constitué de 75% d'hydrogène et 25% d'hélium en masse. Le reste ("métaux") compte pour environ 0.1%. Cette composition change lentement alors que le Soleil transforme l'hydrogène en hélium à l'intérieur de son noyau.

Le Soleil émet des ondes radio, des rayons X, des particules énergétiques, une quantité importante de neutrinos, en plus de la lumière visible. La production d'énergie du Soleil (386 milliards de milliards de mégawatts) est produite par la fusion nucléaire.

L'étoile Soleil est constituée de plusieurs couches de gaz ayant chacune des propriétés thermodynamiques particulières (fig.4). De l'intérieur vers l'extérieur on distingue :

a) - Le noyau solaire

- épaisseur moyenne environ 25% le rayon solaire.
- température approximative de15 Millions de °K.
- 40% de la masse du Soleil et sa densité =160.
- sous de très hautes pressions et de température, l'hydrogène est transformé en hélium.
- émission d'une quantité très importante de neutrinos.

b) - La zone radiative

- épaisseur moyenne environ 60% le rayon solaire.
- température varie entre 1 et 7 millions °K.

- chaleur produite dans cette zone et celle du noyau est transportée sous forme de photons qui entrent constamment en collision avec les électrons avec un temps de transport d'environ 10^6 années.

c) - La zone convective

- épaisseur moyenne = 100.000 km.
- température = 15.000 à 1 million °K. Elle est animée par des mouvements de convection qui sont à l'origine du transfert de l'énergie (sous forme de chaleur) de l'intérieur vers l'extérieur.

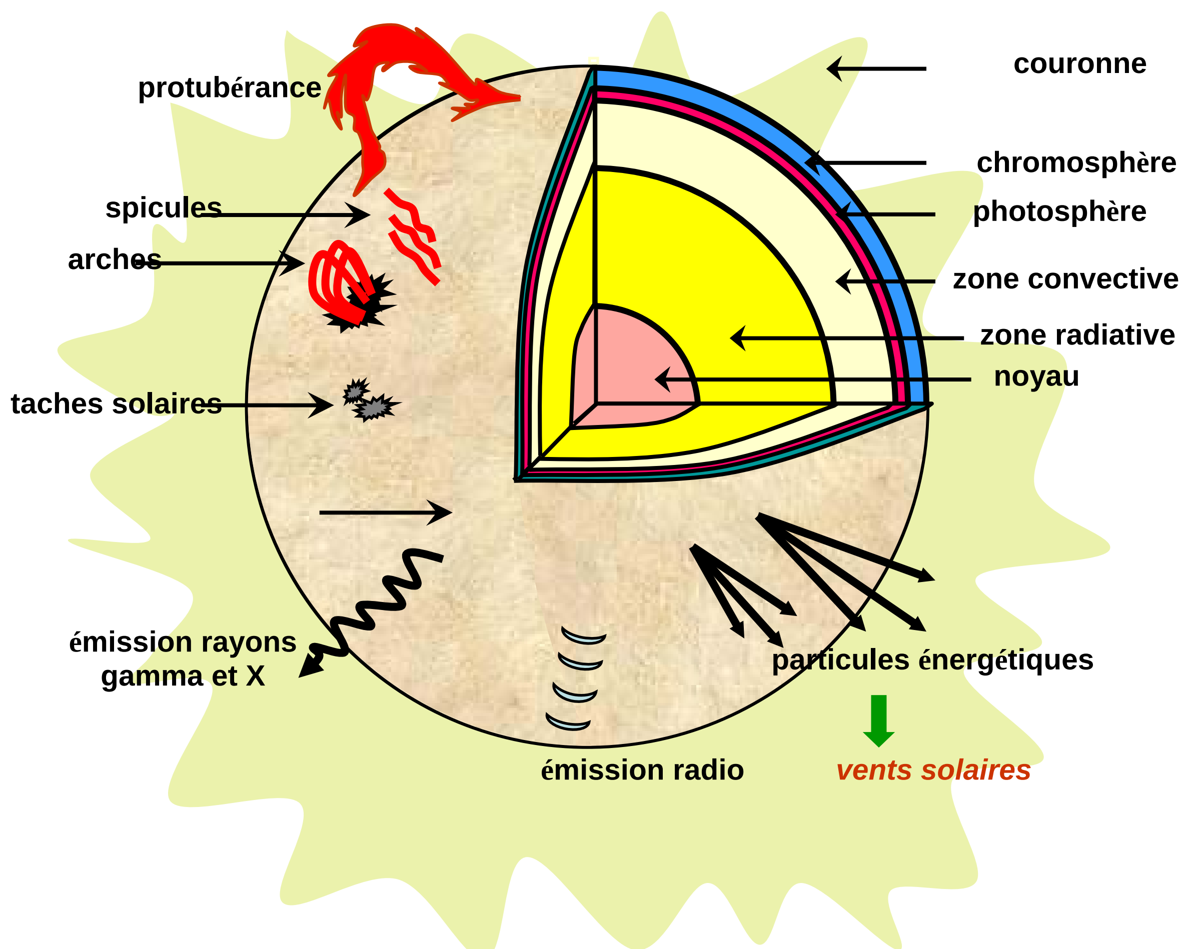
d) - La photosphère

- aspect granuleux
- constituée de 75% d'hydrogène, 24% d'hélium et 1% d'autres éléments que l'on trouve dans l'univers.
- épaisseur = 500 km.
- température = 6.000 °K environ.
- émission dans la lumière visible et les infrarouges.
- apparition en surface des taches et facules solaires = régions sombres car plus froides (4.200°K) ayant des dimensions pouvant atteindre 25.000 km. Ces taches solaires restent en place seulement de quelques jours à quelques mois.

e) - La chromosphère

- c'est une configuration semi - transparente de gaz
- épaisseur comprise = 1.500 à 3.000 km.
- Température environ = 4.500 °K.
- présence de spicules qui sont des jets verticaux de gaz qui peuvent atteindre 10.000 km d'altitude avec une vitesse de 20 à 50 km/s.
- spectre est dominé par des raies d'émission intense notamment H alpha qui lui donne une teinte rougeâtre prononcée.

fig.4 : Organisation du Soleil



f) - La couronne

- constitue l'atmosphère externe du Soleil.
- température environ = 1 Millions de °K.
- visible seulement lors d'éclipses totales de Soleil.
- pas de limite précise.
- émet des raies ultraviolettes ainsi que des rayons X et des ondes radios.
- le flux de matière chaude qui s'en échappe continuellement est à l'origine du *vent solaire*.

2. – L'activité solaire

a) - Le champ magnétique solaire

Le Soleil est caractérisé par un champ magnétique très puissant (en comparaison au standard terrestre) et très complexe; il lié aux courant convectifs à l'intérieur de cette étoile. La région de l'espace dans laquelle le champ magnétique solaire est dominant est appelée *héliosphère*. Bien que le vent solaire s'échappe en direction radiale du Soleil, la rotation du Soleil donne au champ magnétique une forme de spirale.

Tous les 11 ans, les pôles magnétiques du Soleil s'inversent : On parle donc de *cycle solaire* qui dure en fait 22 ans. Au moment du maximum d'activité solaire, tous les 11 ans, on observe un grand nombre de taches, regroupées dans des régions actives qui sont le siège d'éruptions.

b) - Les protubérances

Les protubérances appartiennent aussi à la photosphère. Elles correspondent à des jets de matière le long de lignes de champ magnétique entre deux taches solaires en formant une arche. Ce jet s'accompagne d'émissions des rayons X, des ondes radioélectriques et des rayons gamma.

Les protubérances éruptives sont les plus violentes : elles peuvent atteindre la vitesse de 600 000 km/h et elles peuvent s'élever jusqu'à plus d'un million de km.

c) - Les éruptions solaires

Les éruptions solaires (qu'il ne faut pas confondre avec les protubérances), sont également présentes sur la photosphère. Il s'agit d'un ouragan de particules atomiques qui souffle à 3 millions de km/h qu'on appelle le *vent solaire*, qui monte toujours en spirale du champ magnétique pour atteindre l'orbite de la Terre. Ces jets de matière rayonnant dans les rayons X et UV.

IV – LES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

Voici brièvement les principales autres composantes du système solaire :

1. - Les Satellites

Les *satellites planétaires* gravitent autour des planètes. On connaît au moins 60 satellites dans le système solaire. Leur diamètres varient de 5300 km à 30 km. Il sont constitué en général d'un mélange de roches et de glaces.

Il y a deux planètes qui n'ont pas de satellites, Mercure et Vénus, tandis que les planètes Jupiter, Saturne et Uranus en possèdent plus qu'une dizaine chacune.

Sauf la Lune et quelques satellites de la planète Jupiter, les densités des satellites sont en général inférieures à 2.

La plupart des satellites montrent d'abondants cratères d'impacts. Seule la lune Io de la planète Jupiter possède des volcans actifs comme on en observe sur la Terre.

2. - Les Astéroïdes

Les *astéroïdes* sont des corps rocheux de quelques km à 1000 km de diamètre. Ils se localisent entre les orbites des planètes Mars et Jupiter dans une région que l'on appelle *ceinture d'astéroïdes*.

Il existe plus de 4000 astéroïdes numérotés, mais leur masse totale n'est que 5% de celle de la Terre. Les densités des astéroïdes varient de 1,6 à 2,5.

3. - Les Comètes

Les *comètes* sont des astres constitués de glaces et de poussiers, de forme irrégulière, tout comme les astéroïdes. Leur taille est comprise entre 1 et 40 km. Elles ont des orbites non-elliptiques autour du Soleil, en dehors de l'écliptique. Leur masse dépasse de 50 fois celle de la Terre.

A cause du chauffage par la radiation solaire, la comète émet des quantités importantes de gaz et produit une queue spectaculaire.

Leur origine serait la ceinture de Kuiper et//ou le nuage d'Oort. Leur révolution autour du soleil peut durer 76 ans (comète de Halley) jusqu'à 2.400 ans (comète de Hall - Bopp).

4. - Les Météorites

Les *météoroïdes* représentent des fragments de débris provenant des astéroïdes ou de comètes qui entrent dans l'atmosphère de la Terre.

Les fragments des grands météoroïdes qui tombent sur la surface terrestre sont appelés *météorites*. Elles représentent donc des échantillons de matière extraterrestre.

Chaque jour, environ 1000 tonnes de météoroïdes entrent dans l'atmosphère de la Terre dont la plupart sont consumés avant qu'ils ne puissent tomber à la surface du globe.

On classe les météorites en trois groupes sur base de l'abondance relative des métaux et des minéraux silicatés : *météorites pierreuses, météorites ferro-pierreuses et météorites métalliques.*

Cette diversité est en relation avec le mode de formation des astéroides qui sera examiné dans la section suivante (TD pour plus de détail).

V - LA FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE

Plusieurs hypothèses ont été avancées quant à l'origine du système solaire. Les interprétations récentes, basées sur des études chimiques des météorites et sur l'étude des propriétés physico-chimiques des astres, convergent à l'idée que le Soleil et les planètes proviennent d'un même nuage composé de gaz et de poussières qui aurait passé par plusieurs étapes :

1. Il y a environ 5 milliards d'années ce nuage étant en rotation, s'effondre sous sa propre gravité, puis il s'est aplati pour former un disque.
2. Le centre de ce disque se comprime et lorsque sa masse fut suffisamment dense et chaude, les réactions nucléaires se sont enclenchées. Ainsi on a naissance d'une *protoétoile* autour de laquelle gravite le reste du gaz et les poussières (10% de la masse initiale).
3. Pendant ce temps, au niveau du *disque protoplanétaire* en gravitation et relativement froid, la poussière s'agglomèrent (*accrétion*) pour former des corps solides : des astéroïdes puis des *planétoïde*s attirant vers eux de plus en plus de matière.
4. Au rythme de collisions successives, les planétoïdes forment un agglomérat de taille supérieure; tandis que la chaleur est alors si importante que ces corps entrent en fusion : le corps ainsi formé est appelé une *protoplanète*.

L'évolution de la protoplanète se fait par accrétion de la matière selon deux modes (fig.5) :

• accrétion homogène = agglomération de la matière non différenciée ensuite la chaleur emprisonnée dans la protoplanète et produite par les collisions et la désintégration des éléments radioactifs va entraîner des mouvements de la matière devenue fluide. Ce fluide va subir une différenciation avec accumulation d'éléments lourds vers le centre de la future planète. Les éléments légers vont migrer vers la surface.

• accrétion hétérogène : la différenciation s'installe très tôt pendant l'agglomération des corps solides : les noyaux de fer se différencient les premiers; ils attirés par la gravitation vont au centre pendant que les plus légers vont migrer vers les zones externes.

C'est ainsi que naissent les planètes telluriques. Dans notre planète Terre on retrouve un noyau lourd composé de fer et de silicium pendant que les silicates se situent plutôt dans le manteau ou la croûte. Par la suite, d'autres matériaux légers ont été ajoutés par l'intense bombardement de météorites.

Parallèlement à ces événements, le vent solaire chasse les poussières et les gaz vers l'extérieur du système qui va se condenser pour former les planètes géantes gazeuses et leurs satellites.

VI – LES PLANETES EXTRASOLAIRES = EXOPLANETES

En 1995 fut découverte la première planète extrasolaire. Actuellement plus 270 planètes extrasolaires ont été recensées. Récemment mi juin 2008 un nouveau système solaire du nom HD40307 a été découvert ; il est composé de trois « *super Terres* » (planètes à la compositions quasi similaire à celle de la Terre) situé à 42 années lumières de notre planète.

Eléments de cour de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 4

LA LUNE

I – LES CARACTERES PHYSIQUES ET ASTRONOMIQUES DE LA LUNE

- ***Age*** **:** environ 4.6 milliards d'années.
- ***Forme*** **:** c'est une sphère presque parfaite. Sa surface présente :
- des zones claires appelées *terra* ("*continents*"), accidentées remplies de cratères et de sommets qui résultent d'impacts. On y trouve des chaînes de montagne dont l'altitude peut atteindre 9000 m. Ces zones sont bien développées dans la face cachée de la Lune.
- des zones sombres appelées *mare* (du mot latin *mer*)*;* constituées de vastes plaines, lisses, créées par d'énormes météorites. On y observe des crevasses, ou rainures, des vallées, des falaises et des pitons rocheux isolés. Ces zones caractérisent la face cachée de la Lune **(fig.1)**.
- ***Diamètre*** **:** 3476 km (3/11 du diamètre terrestre)
- ***Masse*** **:** 7,3x10^{22} kg, soit environ 80 fois inférieure à la masse de la Terre.
- ***Volume*** **:** 50 fois inférieur au volume terrestre.
- ***Densité moyenne*** **:** 3,34 g/cm^3 (celle de la Terre est de 5,515 g/cm^3).
- ***Pesanteur*** **:** Elle est six fois moins forte que sur la Terre.
- ***Atmosphère*** **:** Pratiquement inexistante.
- ***Température à la surface*** **:** varie de +125°C sur la partie éclairée par le Soleil à -175°C sur la partie obscure.
- ***Lumière*** **:** La Lune est éclairée par la lumière du Soleil, elle en réfléchit entre 7 et 10% au niveau des mers et de 11 à 18% dans les régions continentales.
- ***Orbite de la Lune*** **:** La Lune décrit autour de la Terre une ellipse d'excentricité 0.055 parcourue dans le sens direct (sens inverse des aiguilles d'une montre) dont la Terre est l'un des foyers ; cette trajectoire elliptique engendre une variation de la distance entre la Terre et la Lune **(fig.2)**.
- ***Distance Terre - Lune*** **:** 384.400km en moyenne, soit environ 30 fois le diamètre terrestre. Rappelons que la distance Terre / Soleil est d'environ 150.000.000km.
- ***Inclinaisons*** **(fig.3):**
  - inclinaison de l'orbite de la Lune par rapport à l'écliptique 5°09'
  - inclinaison du plan équatorial de la Lune par rapport à son orbite 6°41'
- ***Période de révolution autour de la Terre*** **:**
  - La révolution sidérale : 27 jours, 7 heures 43 minutes
  - La révolution synodique ou lunaison : 29 jours, 12 heures 44 minutes, c'est également la durée du jour lunaire.
- ***Période de rotation sur elle-même*** **:** 27 jours, 7 heures 43 minutes.
- ***Autres particularités*** **:**
  - La Lune est, avec le Soleil, à l'origine des marées océaniques de la Terre.
  - Elle présente toujours la même face à la Terre.
  - La lumière met environ une seconde pour parcourir la distance Terre / Lune

- La Lune s'éloigne de la Terre de 4,4cm par an. Cette vitesse d'éloignement est constante depuis l'Antiquité.

II – GEOLOGIE DE LA LUNE

1. - Pétrographie

L'examen des roches du sol lunaire conduit à les classer en trois catégories : les *anorthosites* les *norites* et les *basaltes.*

- Les anorthosites sont des roches plutoniques (formée en profondeur), claires, de structure grenue riches en feldspaths sodiques et de pyroxènes avec un peu d'olivine. Leur âge s'établit entre 4000 et 4500 Ma.

- Les norites ainsi nommé car elles sont riches en potassium et en phosphore. Elles ont une composition minéralogique gabbroïque riche en pyroxène calcique Elles présentent une répartition ponctuelle sur la surface de la Lune au niveau des impacts sur le socle basaltique. Leur formation est controversée.

- Les basaltes occupent les mares, c'est une roche volcanique sombre dense, épanchée sur des coulées superposées et très étendues.

- Une épaisse couche de poussière de 1 à 10m appelée le *régosol* ou, *le régolite*, recouvre toute la surface lunaire. Cette couche contient des fragments de roches qui résultent de l'impact et de petites météorites. L'ensemble n'a pas subit ni transport et ni transformation; mais il est contaminé par le vent solaire.

2. - Structure interne

Les données sismiques montrent que la lune est constituée de trois couches (fig.4). La croûte, d'épaisseur de 60 km à 100 km, constituée par les anorthosites

- Le manteau lunaire, d'épaisseur de 1000 km, riche en minéraux tels que l'olivine et le pyroxène.

- Le noyau, de 700km d'épaisseur, composé de fer et éventuellement de nickel; d'une température avoisine les 1500°C .

3. - Sismicité

Lors des missions Apollo des sismomètres ont été mis en place. Les séismes d'origines internes qui ont été enregistrés n'ont pas dépassé la magnitude 3 sur l'échelle de Richter.

4. – Champ magnétique

La Lune possède un champ magnétique d'une extrême variabilité. Il s'agit d'un champ magnétique résiduel en surface.

III – RELATIONS TERRE - LUNE

1. - La Lune nous présente toujours la même face, que l'on appelle la face visible

La Lune possède deux types de mouvements (fig.3):

- La révolution sidérale est le mouvement de rotation de la Lune autour de la Terre Cette trajectoire est elliptique.

- La rotation sidérale est le mouvement de rotation propre de la Lune sur son axe.

Ces deux mouvements ont une période strictement identique : 27j 7h 43mn 11.5s. Cela veut dire que la Lune fait exactement un tour sur elle même pendant qu'elle réalise un tour autour de la Terre. De ce fait notre satellite reste toujours orienté de la même façon vers nous. (Il aura fallu attendre la conquête de l'espace pour enfin découvrir la face cachée de la Lune).

2. – Les phases lunaires : las quartiers de la Lune

La face visible peut être complètement éclairée par le Soleil : *pleine Lune*, entièrement plongée dans la nuit : *nouvelle Lune*, ou seulement partiellement éclairée : diverses *phases (ou quartiers) de la Lune* dite *gibbeuses* **(fig.5)**. L'intervalle entre deux phases identiques de la Lune est appelé *mois synodique*; il est égal à 29,53 jours. Cette valeur est supérieure de 2,21 jours au *mois sidéral* à cause du mouvement de l'ensemble Terre-Lune autour du Soleil qu'on explique de la façon suivante:

Pendant le *mois sidéral* de la lune, la terre se déplace d'environ 27° de plus sur son orbite **(fig.6)**. Ainsi, au bout d'un mois sidéral, ce n'est pas encore la pleine lune. La lune doit parcourir environ 27° de plus sur son orbite pour être de nouveau diamétralement opposée au soleil. Puisque la lune parcourt 13°par jour (360° / 27,3 jours), il lui faudra un peu plus de deux jours. Et ainsi, après 29,5 jours, c'est-à-dire après un *mois synodique*, ce sera de nouveau la pleine lune. Le cycle des phases de la lune est donc plus long de 2,2 jours que sa période sidérale. Cela implique que les calendriers annoncent une phase donnée tous les 29 ou 30 jours, L'alternance de mois de 29 et 30 jours est donc la base des calendriers lunaires ;

3. – L'influence de la Lune et du soleil sur les amplitudes des marées

La Lune et le Soleil exercent une attraction gravitationnelle suffisamment importante pour provoquer les effets de marées sur la Terre. Le Soleil est bien plus massif que la Lune, mais également beaucoup plus éloigné de nous que cette dernière. Pour cette raison, le Soleil ne contribue que pour un tiers environ aux marées terrestres.

Lorsque la Lune et le Soleil sont à angle droit par rapport à la Terre, on parle de marées de morte-eau

Lorsque la Terre, la Lune et le Soleil sont dans le même plan (équinoxe) les effets combinés de la Lune et du Soleil sont les plus importants créant de forts coefficients : on parle de marée de vive-eau

4.- L'éclipse solaire

Il faut distinguer deux catégories d'éclipses : les éclipses de Soleil, et les éclipses de Lune. (fig.7).

- les éclipses de Soleil :

Elles surviennent quand la Lune s'interpose entre le Soleil et la Terre.

Les seules périodes favorables pour les éclipses de Soleil sont lorsque la Lune passe entre le Soleil et la Terre à proximité d'un nœud de l'orbite lunaire. Les nœuds de l'orbite lunaire sont les deux points d'intersection entre l'écliptique et l'orbite lunaire

Dans ces conditions alors, le Soleil, la Lune et la Terre sont parfaitement alignés et on a une éclipse. Ces conditions ne sont réunies qu'une à deux fois par an (et en des points différents du globe).

- les éclipses de Lune :

Elles fonctionnent sur le même principe que les éclipses de Soleil sauf que cette fois-ci, c'est la Terre qui s'interpose entre le Soleil et la Lune. Ces éclipses ont donc lieu au moment de la pleine Lune ; elles n'ont lieu elles aussi qu'en moyenne deux fois par an toujours à cause de la trajectoire inclinée de la Lune.

IV. – NAISSANCE DE LA LUNE

La Lune s'est formée il y a 4,60 milliards d'années après une gigantesque collision entre la Terre et un corps probablement d'un diamètre compris en 100 et 1000 km voir grand comme Mars, composé d'un noyau de fer et de nickel et un manteau de silicates (fig.8 voir TD).

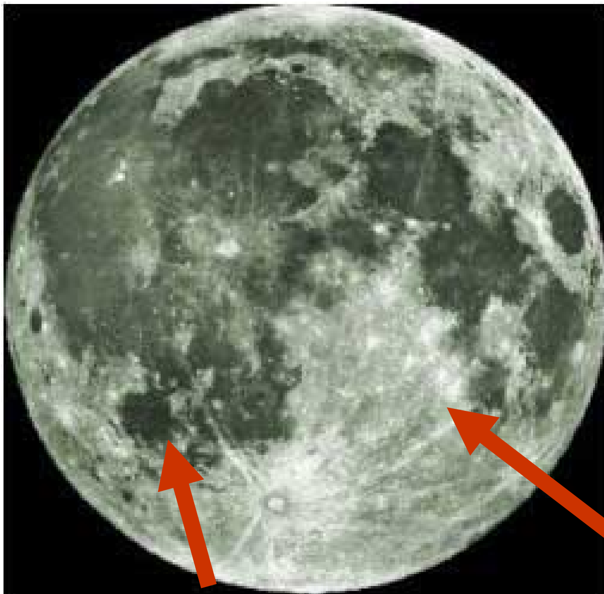
Des morceaux des deux manteaux et des croûtes rocheuses auraient été éjectés dans l'espace. Après l'impact les débris des deux manteaux silicatés vont se répartir en une coquille autour de la Terre puis former un anneau. Tous ces fragments se seraient entrechoqués et se seraient alors agglutinés pour constituer la Lune 10 ans après le choc. (Une formation incroyablement courte à l'échelle des temps géologiques où la genèse des événements se compte habituellement en millions d'années).

Cette collision-fission-accrétion explique la ressemblance de la Lune avec le manteau terrestre, sa pauvreté en fer et en éléments volatils et sa richesse en éléments réfractaires.

Pendant le premier milliard d’années qui a suivi la formation de la Lune, celle-ci a subi un bombardement météoritique intense qui a criblé de cratères la surface lunaire. Comme l’activité interne de la Lune s’est très vite arrêtée, la surface de la Lune a très peu évolué depuis cette période et les impactes sont donc pour la plupart restés visibles.

Fig. 1 :

Forme **:- sphère presque parfaite**





- zones sombres = *mare* (" *mer* ") = vastes plaines, lisses constituées de basaltes
Elles caractérisent la face visible de la Lune

-zones claires = *terra* ("*continents*"), = cratères et de sommets qui résultent d'impacts de météorites
Bien développées sur la face cachée de la Lune

Fig.2 :

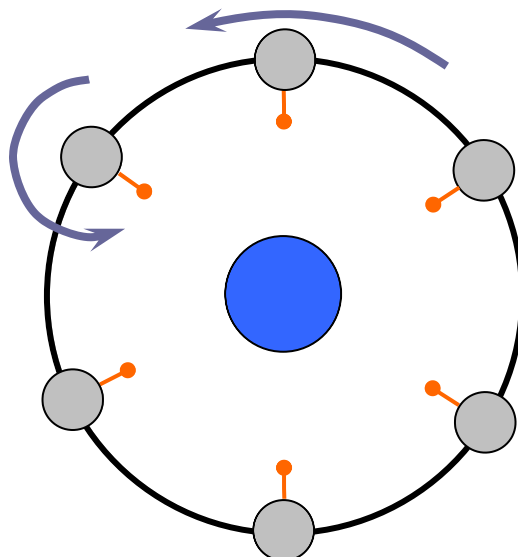
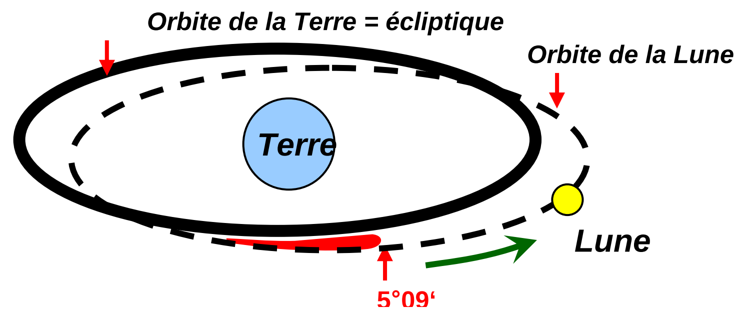


Fig.3 :

- inclinaison de l'orbite de la Lune par rapport à l'écliptique 5°09'



- inclinaison du plan équatorial de la Lune par rapport à son orbite 6°41'

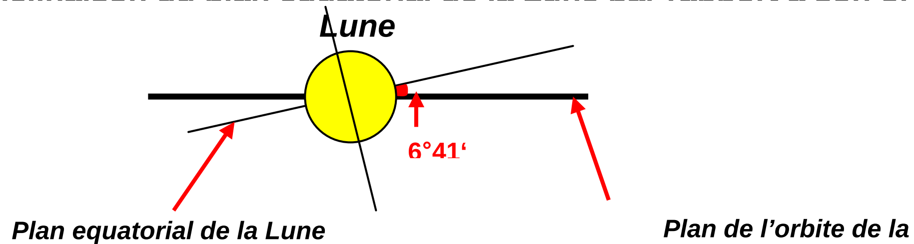


Fig.4 :

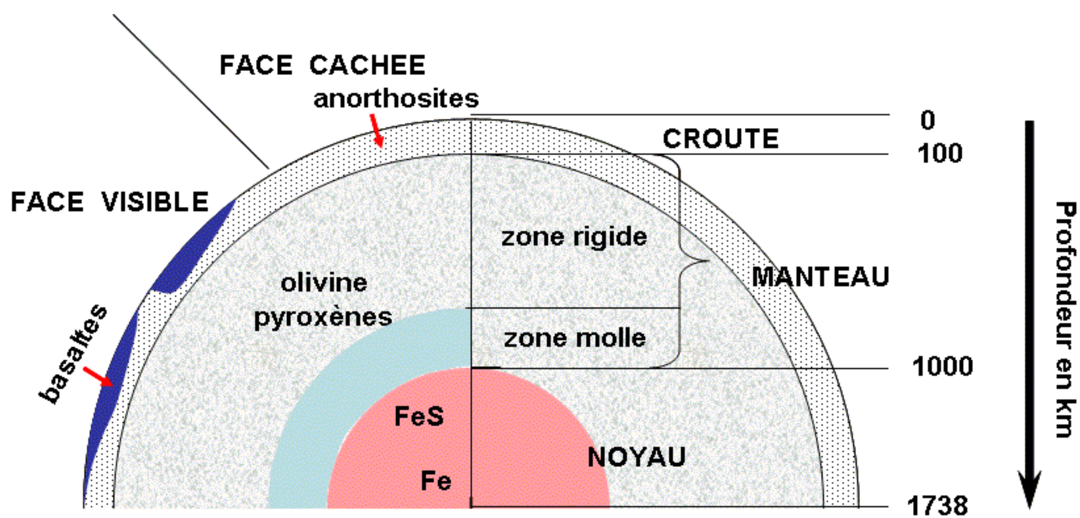


Fig.5 : Positions relatives de la Terre, de la Lune et du Soleil pendant un moins lunaire

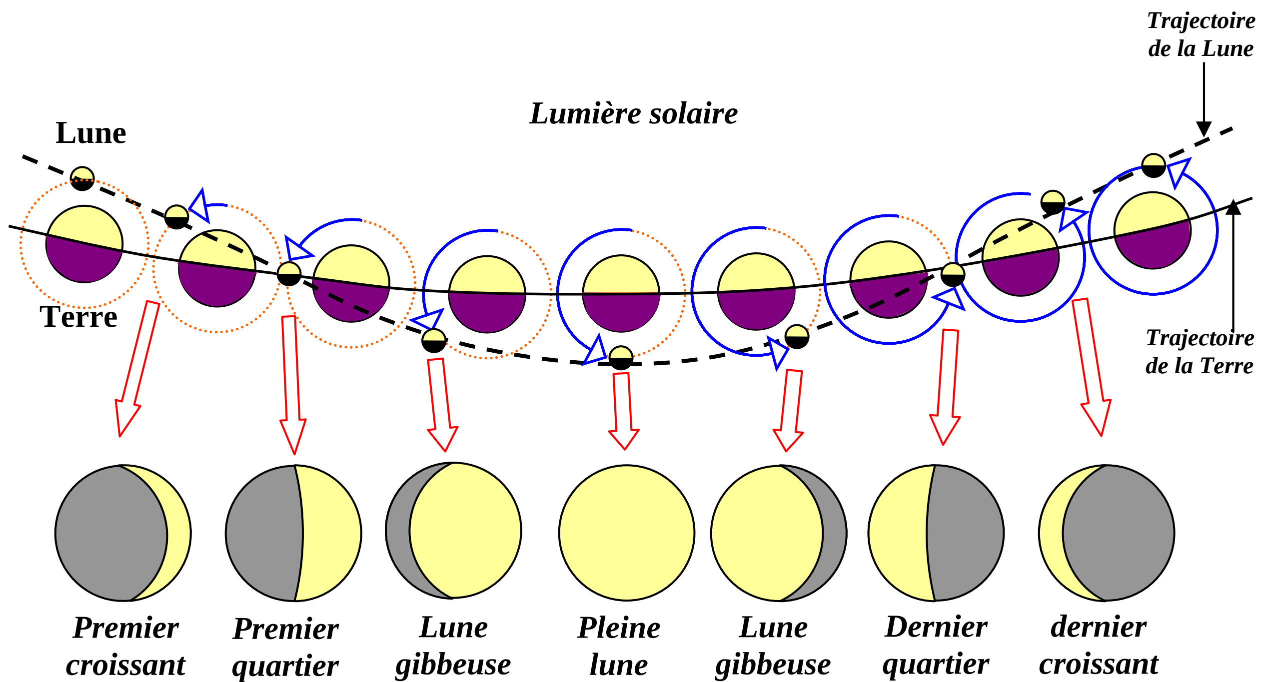


Fig.6 :

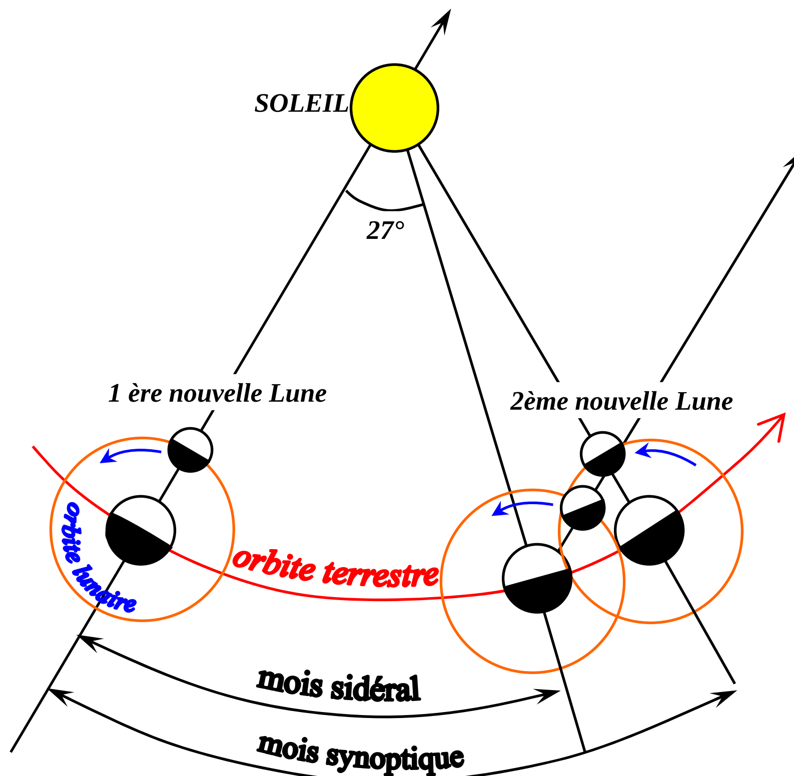
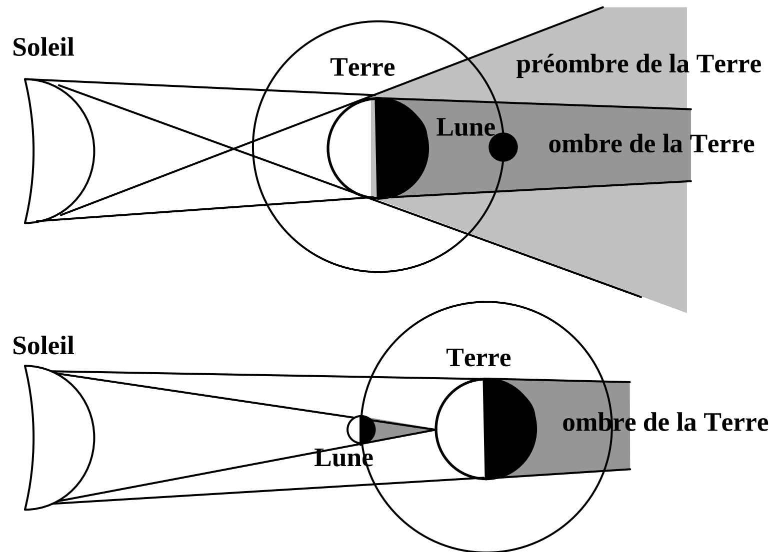
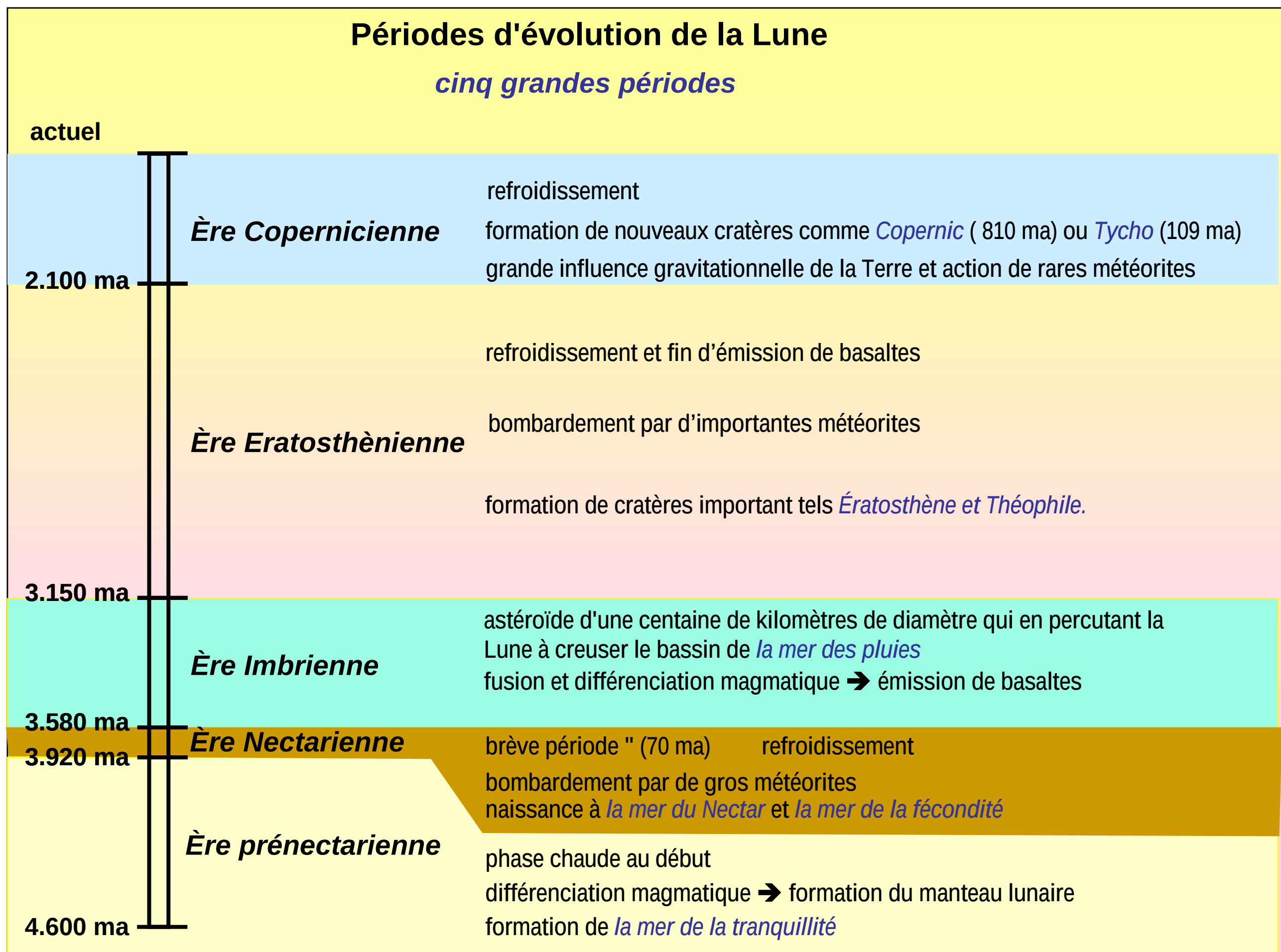


Fig.7 :


Soleil
Terre
préombre de la Terre
Lune
ombre de la Terre
Soleil
Terre
ombre de la Terre
Lune


Périodes d'évolution de la Lune
cinq grandes périodes
actuel
Ère Copernicienne
refroidissement
formation de nouveaux cratères comme Copernic (810 ma) ou Tycho (109 ma)
grande influence gravitationnelle de la Terre et action de rares météorites
2.100 ma
Ère Eratosthènienne
refroidissement et fin d'émission de basaltes
bombardement par d'importantes météorites
formation de cratères important tels Ératosthène et Théophile.
3.150 ma
Ère Imbrienne
astéroïde d'une centaine de kilomètres de diamètre qui en percutant la Lune à creuser le bassin de la mer des pluies
fusion et différenciation magmatique ➔ émission de basaltes
3.580 ma
Ère Nectarienne
brève période " (70 ma)
refroidissement
bombardement par de gros météorites
naissance à la mer du Nectar et la mer de la fécondité
3.920 ma
Ère prénectarienne
phase chaude au début
différenciation magmatique ➔ formation du manteau lunaire
formation de la mer de la tranquillité
4.600 ma